

Approved For Release STAT
2009/08/31 :
CIA-RDP88-00904R000100130

Dec

Approved For Release
2009/08/31 :
CIA-RDP88-00904R000100130



Вторая Международная конференция
Организации Объединенных Наций
по применению атомной энергии
в мирных целях

A/CONF/15/P /2078
USSR
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

ОПЫТЫ К ОБОСНОВАНИЮ ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМЫХ ПОТОКОВ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

А.Г. Истомина, И.Е. Кеирим-Маркус

И. В в е д е н и е

Современные предельно-допустимые дозы для внешнего γ -излучения опираются на большой фактический материал, собранный в течение полувекковой практики работы с рентгеновскими и γ -лучами и в многочисленных экспериментах. Вместе с тем, опытные данные по хроническому действию малых доз тепловых нейтронов практически отсутствуют, в частности, потому, что довольно трудно получить условия, при которых доза создавалась бы исключительно тепловыми нейтронами.

Поэтому существующие предельно-допустимые уровни облучения тепловыми нейтронами базируются не на экспериментальных данных, а на вычислениях, исходящих из того, что биологическое действие тепловых нейтронов складывается из действия продуктов ядерных реакций, которые возникают в тканях организма под действием тепловых нейтронов. Наибольшую роль играют реакции $N^{14}(n, p)C^{14}$; $C^{14} \xrightarrow{\beta} N^{14}$, в результате которой возникает протон с энергией 0,62 Мэв и $H^1(n, \gamma)D^2$, при которой испускается γ -квант с энергией 2,2 Мэв. Другие реакции, такие, как $N^{14}(n, \gamma)N^{15}$; $P^{31}(n, \gamma)P^{32}$, $P^{32} \xrightarrow{\beta} S^{32}$; $Na^{23}(n, \gamma)Na^{24}$, $Na^{24} \xrightarrow{\beta} Mg^{24}$, $Cl^{35}(n, p)S^{35}$, $S^{35} \xrightarrow{\beta} Cl^{35}$ и др., играют второстепенную роль; их вклад в общую дозу не превышает нескольких процентов (10).

25 YEAR RE-REVIEW

-2-

Как известно, при определении предельно-допустимых потоков исходят из положения, что ни в одной точке организма доза не должна превосходить предельно-допустимой, равной 0,05 бэр в день. Для вычисления предельно-допустимого потока тепловых нейтронов рассчитывают распределение потока протонов от реакции на азоте и γ -квантов - от реакции на водороде в полубесконечной тканеподобной среде, облучаемой извне тепловыми нейтронами. Затем вычисляют плотность поглощенной энергии и в той точке, где она максимальна, приравнивают ее значение предельно-допустимой дозе, выраженной в биологических эквивалентах рентгена (1,8-9, 11-14).

Для последней операции, очевидно, необходимо знать величину ОБЭ для протонов. Обычно она принимается равной 10. При данном методе вычисления максимальная плотность поглощенной энергии излучения оказывается близ поверхности среды. Приравнивая ее 0,05 бэр, вычисляют предельно-допустимый поток тепловых нейтронов. Полученную величину уменьшают еще на коэффициент, учитывающий альбедо тканеподобной среды.

Исходя из того, что вклады протонной и γ -компоненты в плотность поглощенной энергии приблизительно равны (1), для ОБЭ тепловых нейтронов получают значение 5

$$(\text{ОБЭ} = \frac{\text{бэр}}{\text{фэр}} = \frac{0,5 \times 10 + 0,5 \times 1}{0,5 \times 1 + 0,5 \times 1} = 5,5). \text{ Эта величина включена в}$$

действующие предельно-допустимые уровни облучения (2), (9).

В работах (11, 12) экспериментально исследовалось распределение нейтронов, падающих перпендикулярно на полубесконечный слой парафина. Плотность нейтронов оказалась максимальной на глубине около 5 мм. Опыты по изучению распределения доз от γ -лучей захвата не проводились.

2. Методика эксперимента

Мы задались целью экспериментально исследовать распределение γ -поля и тепловых нейтронов в организме человека для того, чтобы проверить на опыте правильность расчета предельно-допустимых потоков тепловых нейтронов. Такие измерения удобно производить на парафиновом фантоме. При этом распределение тепловых нейтронов легко исследовать с помощью активации фольг, например, из золота. В силу того, что пробег протонов от реакции на азоте мал, распределение протонов будет таким же, как и тепловых нейтронов.

3979-230

-3-

Для изучения поля γ -излучения внутри фантома мы воспользовались довольно простым методом, идея которого состоит в следующем. Гамма-излучение от реакции на водороде моделируется γ излучением от радиоактивного Na^{24} , образующегося при облучении тепловыми нейтронами фантома, по которому равномерно распределено какое-нибудь соединение натрия (3). В отличие от γ -лучей захвата нейтронов водородом излучение Na^{24} продолжается и по прекращении облучения тепловыми нейтронами и может быть исследовано после облучения, в отсутствие внешних источников излучения.

По качеству γ -излучение Na^{24} мало отличается от γ -лучей захвата в водороде. Действительно, Na^{24} испускает два γ -кванта с энергиями 1,368 и 2,75 Мэв. Коэффициент электронного преобразования в парафине ($\tau + \sigma_a$) для этих энергий равен, соответственно, 0,025 и 0,020 см^{-1} , а для γ -лучей захвата в водороде — 0,022 см^{-1} . Поэтому дозное поле от γ -лучей Na^{24} хорошо моделирует распределение γ -излучения, возникающего в организме при облучении тепловыми нейтронами. Доза этого излучения легко определится по дозе от γ -лучей натрия с помощью следующей формулы. Так как $D_H = \Pi_H h \nu_H (\tau + \sigma_a)_H = 0,0485 \Pi_H$ а $D_{Na} = \Pi_{Na} [0,5 h \nu' (\tau + \sigma_a)' + 0,5 h \nu'' (\tau + \sigma_a)'']_{Na} = 0,0446 \Pi_{Na}$ где D_H и D_{Na} — дозы от γ -лучей захвата в водороде и γ -лучей в Na^{24} , соответственно, Π_H и Π_{Na} числа γ -квантов от водорода и натрия, то $D_H = 1,09 D_{Na} \frac{\Pi_H}{\Pi_{Na}}$ (I).

Для исследований был изготовлен фантом торса человека из смеси парафина с Na_2CO_3 . Количество натрия составляло по весу 0,5%, что по порядку величины близко к естественному содержанию Na в организме [0,1 - 0,3% - (4)].

Фантом собирался из восьми эллиптических цилиндров (рис. I). Объем фантома составлял 42 дм^3 . Размеры и форма фантома выбраны в соответствии с данными анатомического атласа. В связи с тем, что количество атомов водорода в 1 см^3 парафина на 20% больше, чем в ткани, изготовленный фантом эквивалентен тканеподобному фантому с линейными размерами больше на 6% (пунктирная кривая на рис. I) и весом 50 кг.

Облучение фантома тепловыми нейтронами проводилось в графитовой колонне реактора в течение 11 часов. Равномерность потока в полости графитовой колонны предварительно проверялась с помощью золотых фольг.

-4-

Распределение тепловых нейтронов в фантоме также изучалось с помощью золотых фольг диаметром 4 мм, толщиной $7-10 \text{ мг/см}^2$, размещавшихся перед облучением по поверхности и в сечениях фантома. Активность фольги определялась с помощью установки с торцовым счетчиком (5) и контролировалась по 4-9^м счетчику В.И.Дробота (6). После облучения в реакторе по сечениям фантома закладывалась рентгеновская пленка в двустороннем фильтре из алюминия толщиной 1 мм. Предварительными опытами было установлено, что такой фильтр полностью устраняет влияние β -излучения Na^{24} на почернение пленки.

Как известно, рентгеновская пленка обладает большим "ходом с жесткостью" в области спектра γ -лучей ниже 200 Кэв. В связи с этим для измерения дозы γ -излучения со смешанным спектральным составом необходимо, кроме алюминиевых фильтров, использовать компенсирующие свинцовые фильтры.

Мягкое γ -излучение может возникать в фантоме в результате многократного рассеяния. Поэтому необходимо было выяснить, насколько "ход с жесткостью" пленки может искажать измерения дозы. Для этого пленка в одном из сечений эллипса закрывалась на половину площади дополнительным фильтром из 1 мм свинца. Почернение двух частей пленки совпало, что свидетельствует о практическом отсутствии мягкого γ -излучения внутри фантома и дает возможность изучать распределение дозы с помощью рентгеновской пленки без компенсирующих фильтров.

Плотность почернения пленки измерялась при помощи прибора МФ-4.

3. Результаты эксперимента

а) Доза от протонов

При облучении в графитовой колонне поток тепловых нейтронов на разные стороны фантома не одинаков.

Однако если фантом облучить в одном положении, а затем повернуть на 180° вокруг оси, перпендикулярной направлению от центра реактора, то суммарный поток на поверхности фантома оказывается одинаковым и в наших опытах он составлял $4,7 \cdot 10^8$ нейтр/см²сек. Внутри фантома поток нейтронов резко падает до 10-14% от первоначальной величины.

Измерив потоки нейтронов в различных точках фантома, можно

-5-

определить мощность дозы, создаваемую протонами в организме, с помощью следующей формулы:

$$P_p = n_0 \eta N_N \sigma_N E_p \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} / 93 = 2,0 \cdot 10^{-11} n_0 \eta \text{ бэр/сек}$$

где n_0 - поток тепловых нейтронов, η - ОБЭ протонов, N_N - число атомов азота в 1 см³ ткани, σ_N - эффективное сечение реакции (n, p), 93 - энергетический эквивалент грамм-рентгена в ткани в эргах для γ -квантов с энергией 2 Мэв (7), E_p - энергия протонов в Мэв.

Относительная биологическая эффективность протонов точно не установлена. По литературным данным ее значения колеблются в пределах от 2 до 10, причем первая цифра, по-видимому, ближе к истинной для острых реакций организма, а последняя - для отдаленных последствий облучения. Совершенно очевидно, что для определения предельно-допустимых потоков имеют значение отдаленные последствия. Мы сделали расчет для значений относительной биологической эффективности протонов, равных 1, 2 и 10.

Мощность дозы от протонов на поверхности фантома при потоке в 1 нейтр/см²сек будет равна при $\eta = 1$ $P_p = 2,0 \cdot 10^{-11}$ фэр/сек; при $\eta = 2$ $P_p = 4,0 \cdot 10^{-11}$ бэр/сек и при $\eta = 10$ $P_p = 2,0 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек.

Изменение мощности дозы от протонов по оси фантом и по главным полуосям центрального сечения при различных ОБЭ представлено на рис. 2 (пунктирные кривые). Средняя мощность дозы от протонов по всему фантому оказалась равна $1,1 \cdot 10^{-11}$ фэр/сек ($\eta = 1$); $2,2 \cdot 10^{-11}$ бэр/сек ($\eta = 2$) и $1,1 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек ($\eta = 10$) при потоке в 1 нейтр/см²сек.

Отсутствие максимума плотности нейтронов на глубине около 5 мм, отмеченное рядом авторов (11, 12), объясняется тем, что в отличие от этих работ фантом облучался изотропным потоком тепловых нейтронов.

б) Доза от γ -излучения

После обработки рентгеновской пленки мы получили картину распределения γ -излучения по сечениям фантома путем сравнения плотности почернения пленки с кривой почернения, экспонированной на γ -излучении кобальта-60.

3979-230

-6-

Количественный переход от измерений дозы γ -излучения натрия к мощности дозы γ -излучения водорода, которая возникает в момент облучения тепловыми нейтронами, можно сделать следующим образом:

Формулу (I) можно переписать в виде:

$$P_H t / D_{Na} = 1,09 P_H t / \sum P_{Na},$$

где P_H — мощность дозы от γ -квантов захвата в водороде, t — время облучения фантома, D_{Na} — доза от радиоактивного Na, определенная по почернению пленки, P_H — число γ -квантов захвата в водороде в сек из 1 г парафина, $\sum P_{Na}$ — полное число γ -квантов натрия из 1 г парафина за время экспонирования пленки в фантоме.

Отсюда $P_H = 1,09 P_H / \sum P_{Na} D_{Na} = K D_{Na}$

Далее $P_H = n_0 \sigma_H N_H$, где n_0 — поток нейтронов, σ_H — эффективное сечение реакции (n, γ) на водороде, N_H — число атомов водорода в 1 г парафина.

$$\sum P_{Na} = n_0 \sigma_{Na} N_{Na} \cdot 2 (1 - e^{-\lambda t}) \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}),$$

где n_0 — поток нейтронов, σ_{Na} — эффективное сечение реакции (n, γ) на натрия, N_{Na} — число атомов натрия в 1 г парафина, t — время облучения, t_1 — время, прошедшее с момента окончания облучения фантома до начала экспозиции, t_2 — время, прошедшее с момента окончания облучения фантома до окончания экспозиции пленки.

Следовательно, коэффициент K легко вычисляется, если известны t, t_1 и t_2 .

На рис. 2 (штрих-пунктирные кривые) представлено изменение мощности γ -дозы по оси фантома и по главным полуосям центрального сечения. Все результаты отнесены к потоку в 1 нейтр/см²сек на поверхности фантома и пересчитаны на тканевой фантом.

Изменение мощности γ -дозы по каждому из сечений фантома представлены кривыми рис. 3. Мощность γ -дозы в центре каждого сечения принята за 100%. Как следует из кривых, для центральных сечений на расстоянии 3-4 см от поверхности наблюдается максимум мощности γ -дозы.

Полученное распределение γ -поля легко понять, если обратиться к распределению источников γ -излучения-источнику тепло-

-7-

вых нейтронов, изображенному на рис. 2 и 3. Источники γ -излучения концентрируются близ поверхности, а внутри объема создается равномерное γ -поле, как в полном цилиндрическом облучателе. По мере приближения к источникам мощность дозы несколько возрастает, но для элементов объема, расположенных на поверхности, снова падает, поскольку на них действует излучение из половины полного телесного угла.

На рис. 4 дано изменение мощности γ -дозы на поверхности фантома (по образующей). В связи с тем, что мощность дозы от протонов для всех точек поверхности одинакова, эта кривая иллюстрирует неравномерность полной поверхностной мощности дозы от тепловых нейтронов.

Из графиков рис. 2-4, зная конфигурацию фантома, можно вычислить среднюю мощность γ -дозы по всему фантому. Она оказалась равной $9,3 \cdot 10^{-11}$ р/сек (при потоке на поверхности в 1 нейтр/см² сек).

в) Полная мощность дозы

Мы установили вклад отдельных компонент в полную дозу, получаемую при облучении тепловыми нейтронами. Средняя полная мощность дозы $P = P_\gamma + P_p$, создаваемая в человеческом организме потоком на поверхность в 1 нейтр/см²сек, будет равна: при $\eta = 1$ $P = 1,0 \cdot 10^{-10}$ фэр/сек, при $\eta = 2$ $P = 1,15 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек и при $\eta = 10$ $P = 2,0 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек. Таким образом, ОБЭ тепловых нейтронов в среднем по организму человека равна 2, если $\eta = 10$.

Изменение полной мощности дозы по оси фантома для трех значений η представлено на рис. 3-а (сплошные кривые).

На рис. 3-в даны кривые изменения полной мощности дозы по главным полуосям центрального поперечного сечения фантома (сплошные кривые). При $\eta = 1$ мощность на поверхности равна $1,0 \cdot 10^{-10}$ фэр/сек, при $\eta = 2$ $P = 1,2 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек и при $\eta = 10$ $P = 2,8 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек. Таким образом, ОБЭ тепловых нейтронов для поверхностных тканей организма человека около 3, если $\eta = 10$. Этот результат совпадает с расчетными данными Снайтера (14). Как видно из кривых, только при $\eta = 10$ максимальная мощность дозы приходится на поверхность. При $\eta = 2$ максимальная мощность дозы ($P = 1,3 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек) находится на глубине около 2 см от поверхности, а при $\eta = 1$ ($P = 1,15 \cdot 10^{-10}$ фэр/сек) — на глубине ~ 3 см. С учетом ошибки в изме-

-8-

рении порока тепловых нейтронов погрешность полученных значений мощности дозы составляет $\pm 15\%$.

Вклад протонной и γ -компоненты в полную дозу в разных точках организма различен. На рис.5 даны кривые, показывающие, какую часть от полной мощности составляет мощность дозы, создаваемая протонами в разных точках поперечного сечения фантома.

Эти кривые ясно показывают, что если $\eta > 1$, ОБЭ тепловых нейтронов изменяется по объему тела, уменьшаясь в глубину организма.

г) Предельно-допустимый поток тепловых нейтронов

Из полученных значений максимальной мощности дозы можно подсчитать предельно-допустимые потоки тепловых нейтронов на поверхности человеческого организма. Для 8-часового рабочего дня, исходя из значения предельно-допустимой однодневной дозы 0,05 бэр, предельно-допустимый поток тепловых нейтронов равен

$\psi_{\text{пов}} = 6200 \text{ нейтр/см}^2\text{сек}$ ($\eta = 10$)
 при $\eta = 1$ $\psi_{\text{пов}} = 16\,000 \text{ нейтр/см}^2\text{сек}$, а при $\eta = 2$
 $\psi_{\text{пов}} = 14\,000 \text{ нейтр/см}^2\text{сек}$). Это значение немного завышено (не более чем на несколько процентов), так как мы не учитывали влияние второстепенных ядерных реакций, возбуждаемых в биологической среде тепловыми нейтронами.

Полученная цифра для $\eta = 10$ хорошо согласуется с теоретическими вычислениями, которые дают значения около $6500 \text{ нейтр/см}^2\text{сек}$ (8, 9).

Так как индивидуальные дозиметры тепловых нейтронов (ИФКН, ИЛК) измеряют потоки на поверхности тела, полученное значение может служить в качестве нормативного при условии, если доза измеряется индивидуальными дозиметрами тепловых нейтронов.

Мы считаем, что в список узаконенных предельно-допустимых уровней облучения следует включить предельно-допустимый поток тепловых нейтронов на поверхности организма, поскольку именно он определяет биологическое действие тепловых нейтронов. Вместе с тем, в нормах можно оставить и предельно-допустимые значения потока тепловых нейтронов в воздухе как величину, необходимую для расчета защиты от излучений.

Известно, что соотношение между потоком в воздухе и потоком на поверхности тела зависит от конкретных условий. Например, соотношение будет различным при сравнении изотропного и направлен-

-9-

ного потока нейтронов. В изотропном источнике наблюдается ослабление потока за счет экранирования и уменьшения плотности нейтронного газа. При непосредственном контакте с излучающей водородсодержащей средой поток на поверхности тела будет в 5 раз больше, чем в воздухе; рядом с графитовой стенкой поток на поверхности тела возрастает в 8 раз по сравнению с потоком в воздухе.

В литературе поэтому обычно вводят коэффициент безопасности для перехода от вычисленного потока на поверхности организма к предельно-допустимому потоку. Различные авторы предлагают разные коэффициенты. Так, Аглинцев (8) берет в качестве коэффициента 10, Гусев (9) 6. Мы провели несколько опытов, в которых сравнились значения потоков тепловых нейтронов в воздухе и на поверхности парафинового фантома в той же точке пространства. В опытах изменялось расстояние до источника тепловых нейтронов, представлявшего собой $P_0 = Be$ — препарат внутри парафинового блока. Отношение потока на поверхности к потоку в воздухе изменялось в пределах от 2 до 5.

На основании этих ориентировочных опытов, а также исходя из приведенных выше расчетных соотношений, мы полагаем, что по сравнению с потоком на поверхности тела предельно-допустимый поток в воздухе должен быть уменьшен в 5 раз, т.е. составит для 8-часового рабочего дня $\varphi_{\text{воз}} = 1250$ нейтр/см²сек (при $\eta = 10$). Это значение близко к принятому в настоящее время потоку в 1100 нейтр/см²сек. Таким образом, сделанные эксперименты подтверждают правильность существующих в настоящее время предельно допустимых потоков тепловых нейтронов в воздухе.

Можно заметить, что полученное значение вычислено с большим запасом, так как для относительной биологической эффективности протонов принято наибольшее значение $\eta = 10$. Также и для перехода от потока на поверхности тела к потоку в воздухе использован большой коэффициент 5, в то время как усреднение по условиям работы в течение рабочего дня дает, по-видимому, меньшее значение, порядка 3. Однако следует иметь в виду, что в настоящее время не учитывается и не регистрируется действие на организм нейтронов промежуточной энергии — от 0,4 эв до 1 Мэв, поток которых в некоторых случаях составляет значительную часть от общего потока нейтронов. Пока существует белое пятно в этой области дозиметрии нейтронов, сохранение коэффициента безопасности при вычислении норм тепловых нейтронов представляется целесообразным.

3019-230

-10-

В заключение нам хотелось бы сделать еще одно замечание. Как видно из рис. 2 и 5, наибольшая мощность дозы и наибольший вклад протонной компоненты наблюдаются в наружных областях организма. Внутренние органы облучаются почти исключительно

γ -лучами. Поэтому, если искать специфику биологического действия тепловых нейтронов на организм человека, то она, по-видимому, заключается либо в указанном распределении излучения по объекту, либо в действии протонной компоненты на неглубоко расположенные органы (глаза и т.п.).

4. В ы в о д ы

1. На парафиновом фантоме исследовано экспериментально распределение мощности дозы от протонов и γ -лучей, возникающих при захвате тепловых нейтронов в организме человека. Показано, что если ОБЭ протонов принять равной 10, то максимум мощности дозы оказывается на поверхности тела, где вклад протонной составляющей является преобладающим. Внутренние органы подвергаются главным образом действию γ излучения.

2. Если поток на поверхности тела равен 1 нейтр/см²сек, то в организме человека в среднем создается мощность дозы, равная $1,0 \cdot 10^{-10}$ фэр/сек или $2,0 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек (если ОБЭ протонов принята равной 10). Максимальная мощность дозы создается на поверхности тела и составляет $2,8 \cdot 10^{-10}$ бэр/сек. Отсюда предельно-допустимый поток тепловых нейтронов на поверхности тела при 8-часовом рабочем дне равен 6200 нейтр/см²сек. Эту величину рекомендуется принять в качестве одной из узаконенных предельно допустимых норм.

3. ОБЭ тепловых нейтронов равна 1,2-3, а не 5, как принято в настоящее время.

4. Вычисления предельно-допустимых потоков тепловых нейтронов в воздухе дают значение 1250 нейтр/см²сек при 8-часовом дне, т.е. подтверждают правильность принятых в настоящее время значений.

Л и т е р а т у р а

1. Mitchell, Brit. Journ. Radiol., 1947, 20, 79
2. Гусев Н.Г., Справочник по радиоактивным излучениям и защите, Медгиз, 1956
3. Гемпельман Л., Лиско Г., Гофман Д., Острый лучевой синдром, Изд-во ин. лит., 1954
4. Збарский Б.И., Иванов И.И., Мардашов И.И., Биологическая химия, Медгиз, 1954
5. Истомина А.Г., Кеирим-Маркус И.Б., Экспериментальная установка для облучения животных потоками нейтронов, 1957 (в печати)
6. Дробот В.И., Штуккенберг Д.М., Об абсолютных измерениях активности при помощи 4- π счетчика, Докл. Всес. конференции по использованию изотопов, 1957
7. Radiation Dosimetry ' под ред. GF Hine, GL Brownde , N.Y., 1956
8. Аглинцев К.К., Дозиметрия ионизирующих излучений, М-Л, 1950
9. Сб. Исследования в области дозиметрии ионизирующих излучений, 10 Изд-во АН СССР, 1957
10. Hoffman J.G., LH Hempelmann, Am. Journ. Roentgeol., 1957, 77, № 1, 144
11. Capron, Faes, Taveruier, Nature, 1949, 163, № 4134, 129
12. Smith, Tait, Nature, 1950, 165, № 4188, 196
13. Snyder W. Nucleonics, 1950, № 6, 46
14. Snyder W., J. Neufeld. Brit. J. Radiol., 1955, 28, 342;
ORNL-LR-DWG11205, 11204

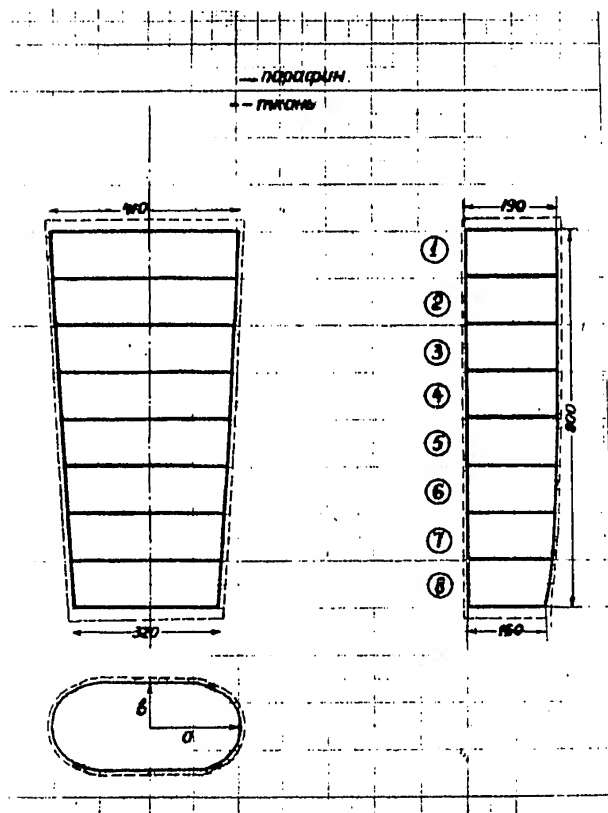


Рис. I. Фантом торса человека

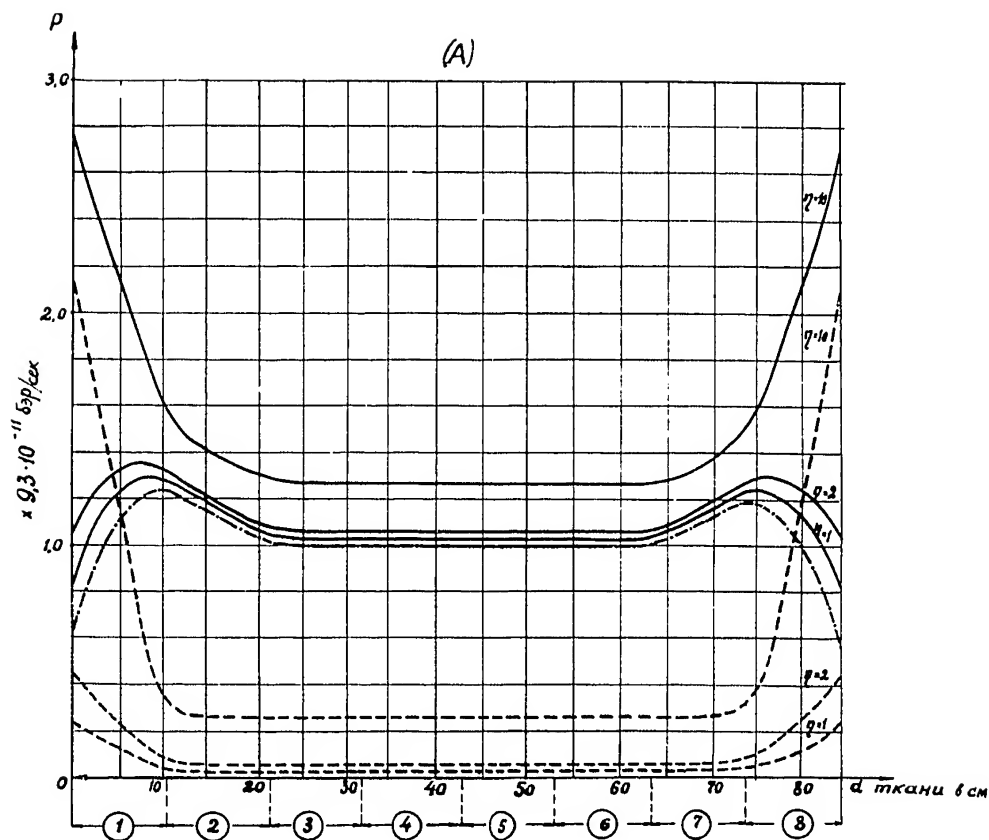


Рис.2а. Изменение мощности дозы по оси фантома (А)

(- - - -) - от протонов (P_p)

(--.--) - от γ -квантов (P_γ)

(- - - - -) - от протонов и γ -квантов ($P_p + P_\gamma$)

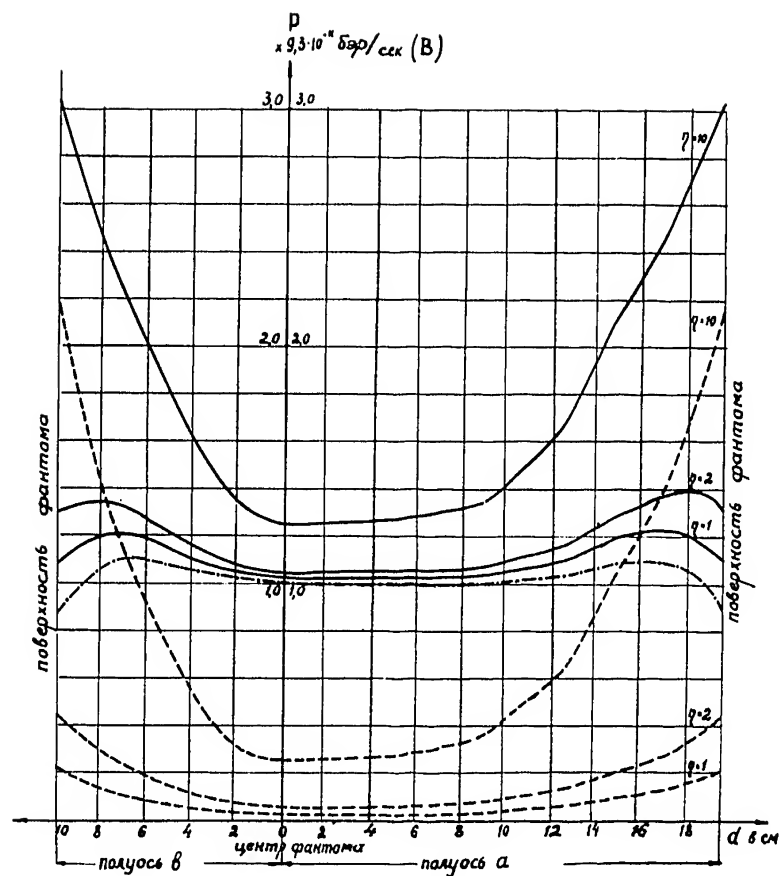


Рис.26. Изменение мощности дозы по главным полуосям центрального поперечного сечения (B)

(- - - -) - от протонов (P_p)

(---.---) - от γ -квантов (P_γ)

(-----) - от протонов и γ -квантов ($P_p + P_\gamma$)

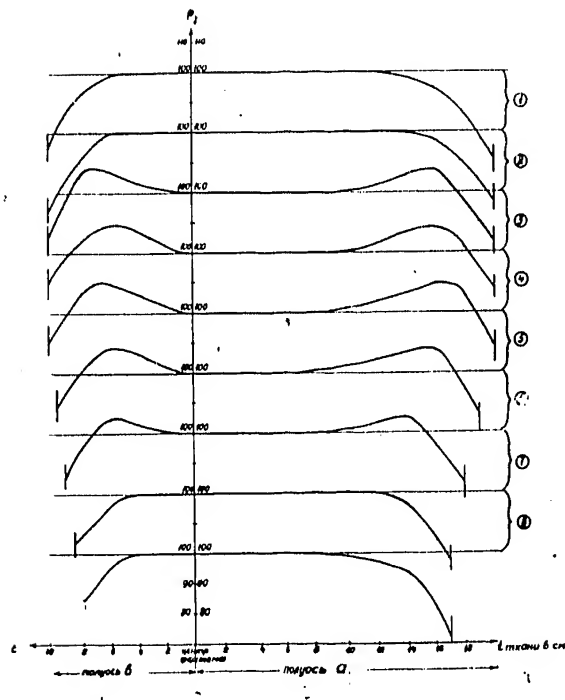


Рис.3. Изменение мощности γ -дозы по сечениям фантома

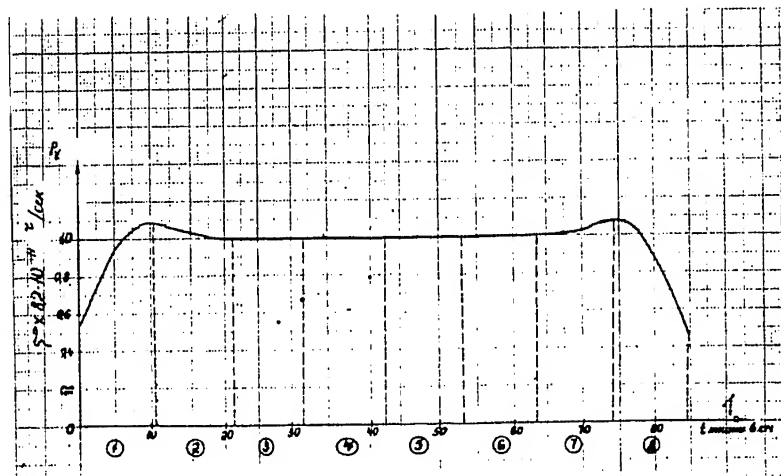


Рис.4. Изменение мощности γ -дозы по поверхности фантома

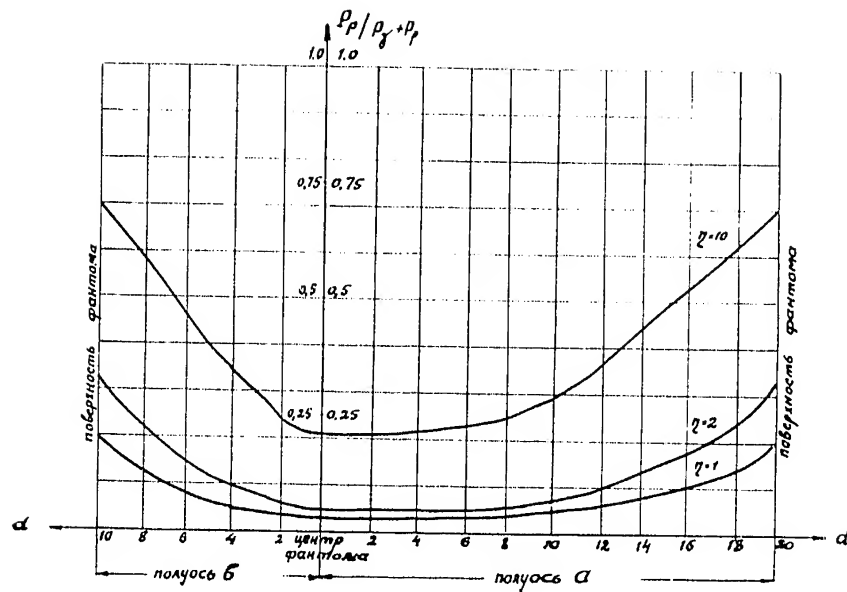


Рис.5. Вклад протонной компоненты в полную мощность дозы

30к, 3979